

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA GEOMETRIA DA ENTRADA DE AR DE UMA CÂMARA LIMPA.

Antônio Victor de Souza Correa, antonio.correa@aluno.cefet-rj.br<sup>1</sup>

Dadui Cordeiro Guerrieri, dadui.guerrieri@cefet-rj.br<sup>2</sup>

Jeziel da Silva Nunes, jeziel.nunes@cefet-rj.br<sup>3</sup>

Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-RJ Campus Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil

**Resumo.** O desafio de realizar estudos com microdispositivos vem do elevado grau de limpeza demandado do ambiente onde o estudo é realizado. Para superar tal desafio, o grupo de pesquisa em Ciências Térmicas em Micro e Macro Escala do CEFET/RJ iniciou o desenvolvimento de uma câmara limpa para trabalhar com microdispositivos. Para que o sistema de filtragem do ar da câmara seja eficiente é necessário que o mesmo apresente um fluxo de ar que percorra toda a câmara limpa, gerando o mínimo possível de recirculação, removendo os contaminantes presentes no ar. A câmara deve apresentar um grau de limpeza classe 100 (ISO5) de acordo com a norma ABNT NBR 14644-1. Este estudo tem como objetivo analisar a sensibilidade do fluxo de ar em função da grade utilizada para separar de forma homogênea o fluxo de ar no interior da câmara, visando reduzir os pontos de recirculação do ar e uma melhor remoção dos contaminantes do interior da câmara limpa. Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado o software CONTAM 3.2 e o software CFD-0, observando diferentes geometrias da grade. Os resultados deste trabalho fornecem informações sobre diferentes formatos da grade, possibilitando avaliar o melhor posicionamento e as melhores dimensões dos furos da grade dentre as geometrias estudadas. O caso utilizando 288 furos com um diâmetro hidráulico de 0,025 m cada, apresentou uma melhor distribuição do fluxo de ar, em função da espessura reduzida das barras da grade, resultando em uma quantidade reduzida de pontos de recirculação.

**Palavras chave:** Câmara Limpa; Sala limpa; Microdispositivos; Distribuição de partículas

**Abstract.** The challenge to realize studies with microdevices is in function of the high cleanliness level demanded of the environment where the study was realized. To overcome this challenge, the CEFET/RJ research group of Thermal Science in Micro and Macro Scale beginning the development of a clean air environment to work with microdevices. So that the air filtration system be efficient is necessary a airflow that travel all the clean air enclosure, generating the lowest re-circulation as possible, removing the contaminants present in the air. The chamber needs to present a cleanliness level as class 100(ISO5) in order of the ABNT NBR ISO 14644-1 standard. This work aims to analyze the sensibility of the airflow in function of the grid used to homogeneously distribute the airflow inside the chamber, looking for reduce the re-circulation points and improve the removal of contaminants. To develop the study, the software CONTAM 3.2 and the software CFD-0 was used, looking to the different geometries of the grid. The results of this work provide information about different geometries of the grid, making possible to evaluate the best positioning and the best dimensions of the holes of the grid among the geometries studied. The case using 288 holes with a hydraulic diameter of 0.0025 m wick, presented a better distribution of the air flow, in function of the smallest thickness of the grid bars, resulting in less recirculation points.

**Keywords:** Clean air environment, Cleanroom, Microdevices, Particle distribution

### 1. INTRODUÇÃO

Os microdispositivos mostram-se cada vez mais presentes em diferentes ramos da indústria, sendo uma importante ferramenta para solução de problemas já existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias. Entretanto, trabalhar com tais equipamentos demanda um elevado grau de limpeza, normalmente encontrado em salas limpas. Para superar a necessidade de uma sala limpa, o grupo de pesquisa em Ciências Térmicas em Micro e Macro Escala do CEFET/RJ iniciou o desenvolvimento de uma câmara limpa, onde microdispositivos possam ser manuseados com o mesmo nível de segurança que o encontrado em uma sala limpa, porém, com um custo de construção significativamente menor (Guerrieri and Nunes, 2019).

A câmara limpa tem como objetivo fornecer um grau de limpeza semelhante ao de uma sala limpa com classificação

classe 100 (ISO5) segundo a norma ABNT NBR 14644-1, onde as concentrações máximas de partículas em suspensão no ar são estipuladas. Para a realização da limpeza do ar presente na câmara foi estipulado um fluxo de ar de 125 m<sup>3</sup>/h quando existem fontes emissoras de contaminantes, o qual adéqua a concentração de contaminantes após 2,5 minutos mas gera um fluxo de ar muito rápido na entrada de ar na câmara, o que demandou a implementação de uma grade para distribuir por toda a câmara o fluxo de ar e reduzir a velocidade do mesmo. Tal grade possuía um total de 55 furos com diâmetro hidráulico de 0,05 m cada, o que resultou em um distribuição do fluxo de ar aceitável porém, com muitos pontos de recirculação originados pelas barras da grade (Correa et al., 2020).

Este trabalho explora as geometrias da grade em dois casos, buscando fornecer de maneira homogênea o fluxo de ar no interior da câmara, promovendo a remoção das partículas em suspensão de modo eficiente. O primeiro caso utiliza um maior número de furos na grade, o segundo caso utiliza furos que apresentam diferentes diâmetros hidráulicos. Os softwares escolhidos para a realização dos estudos foram o CONTAM 3.2 e o CFD-0, softwares destinados a analisar a concentração de partículas no interior e no exterior de edificações, visando analisar a qualidade do ar. Tais softwares são disponibilizados gratuitamente pela NIST (National Institute of Standards and Technology). Os estudos analisam o comportamento do fluxo de ar diante das diferentes geometrias da grade, assim como a dispersão dos contaminantes no interior da câmara limpa.

## 2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a realização das simulações foi implementado no software CONTAM 3.2 em conjunto ao CFD-0 uma representação da câmara limpa em formato retangular. Ambos os softwares foram validados e utilizados anteriormente para a simulação do fluxo de ar em laboratórios (Barbosa and Brum, 2018). O fluxo de ar utilizado nas simulações foi de 125 m<sup>3</sup>/h e um filtro com capacidade de filtragem semelhante ao filtro HEPA H40d, com uma eficiência de 99,9%. Também foram utilizadas fontes emissoras, emitindo uma partícula por segundo, partículas essas com diâmetros de 0,1, 0,5, 1,13, 5,76  $\mu\text{m}$  e densidade igual a do aço inox 316L. As fontes emissoras foram especificadas como fontes emissoras de coeficientes constantes (Walton and Dols, 2013), assim como na definição das características da câmara (Correa et al., 2020). No software CFD-0 foram implementadas as fontes emissoras no centro da câmara assim como as respectivas grades de cada caso.

A validação da malha utilizada nas simulações foi realizada mediante a comparação da velocidade do ar apresentada na linha central da câmara, da parte posterior para a parte frontal. As malhas consideradas para o estudo foram de 251×125×125 (3.921.875 elementos), 225×113×113 (2.873.025 elementos), 201×101×101 (2.050.401 elementos) e 151×75×75 (849.375 elementos). As configurações utilizadas nas simulações estão descritas na Tab.1.

A comparação dos modelos de grade utilizados foi feita através da velocidade do ar, indo da parte posterior da câmara para a parte frontal, em diferentes alturas e por meio da observação de pontos de recirculação. As linhas em vermelho na Fig.1 representam as linhas tomadas para compração dos modelos.

Tabela 1. Configurações utilizadas nas simulações

Item	Valor
Área do piso	0,72 m <sup>2</sup>
Altura da câmara	0,6 m
Eficiência do filtro	99,9 %
Fluxo de ar	125 m <sup>3</sup> /h
Malha	2.873.025
Área da entrada de ar	0,055 m <sup>2</sup>
Área da saída de ar	0,055 m <sup>2</sup>
Densidade do ar	1,1774 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura	20 °C
Esquema de convecção	Power law
Modelo de turbulência	k- $\epsilon$
Dimensão das fontes emissoras (metros)	0,4 × 0,1 × 0,2
Alturas das linhas	0,13 m, 0,29 m e 0,53 m

### 2.1 1° Caso

O 1° caso apresenta um maior número de furos da grade, em relação à grade estabelecida por Correa et al. (2020) durante o estudo da dispersão e remoção de contaminantes da câmara limpa (55 furos), diminuindo a espessura das barras da grade. Para a realização desta geometria, foram implementadas barras com largura de 0,025 m gerando 288 furos, de forma a proporcionar um diâmetro hidráulico de 0,025 m a cada furo, diâmetro este que é metade do considerado por

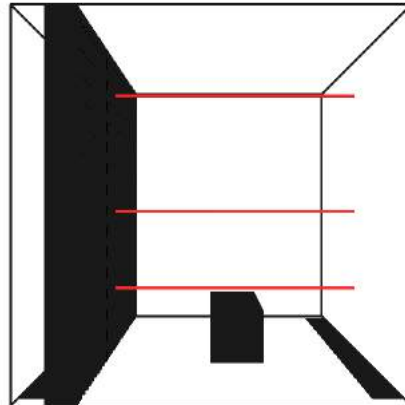


Figura 1. As linhas em vermelho representam as linhas utilizadas para comparação dos diferentes modelos.

Correa et al. (2020) para a definição das especificações da câmara limpa. A Fig. 2 letra a) apresenta a grade referente ao primeiro caso.

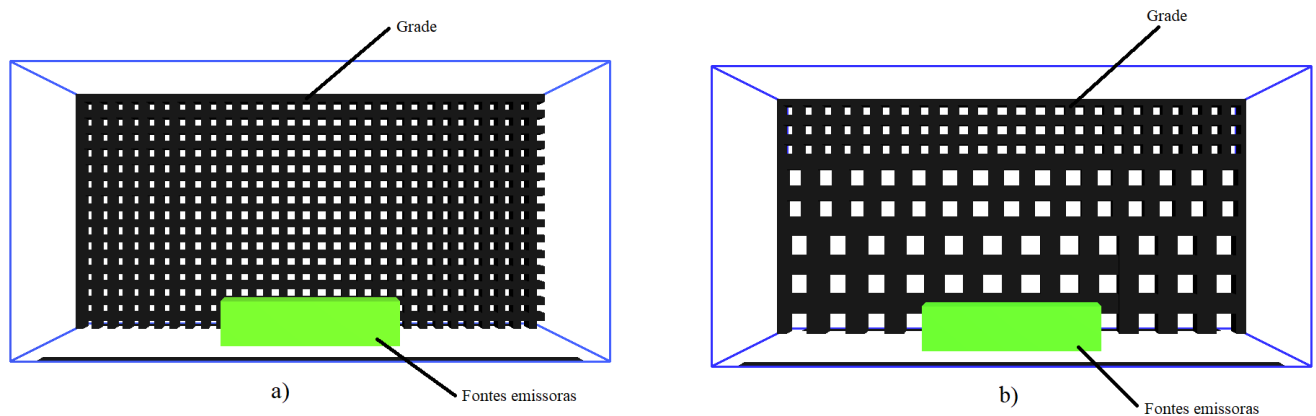


Figura 2. Representação da câmara utilizadas nas simulações, a) apresenta a grade utilizada no primeiro caso e b) apresenta a grade utilizada no segundo caso.

## 2.2 2º Caso

O 2º caso apresenta furos com diferentes diâmetros hidráulicos de acordo com a altura em que se apresentam na grade e um diferente número de furos para cada linha da grade. O diâmetro hidráulico da primeira linha de furos é de 0,05 m e diminui de maneira gradativa até a última linha, onde apresenta um diâmetro hidráulico 0,025 m. A Tab.2 apresenta o número de furos empregados em cada linha assim como o diâmetro hidráulico utilizado. A Fig. 2 apresenta a grade referente ao segundo caso.

Tabela 2. Características dos furos do caso 2

Linha	Número de furos por linha	Diâmetro hidráulico
1,2,3	12	0,05 m
3,4	15	0,04 m
5,6	24	0,025 m

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 1º Caso

A validação referente ao primeiro caso apresentou um erro percentual de 2% na região central da câmara, entre a malha de 3.921.875 elementos e a malha de 2.873.025 elementos, o que levou a utilizar a malha de 2.873.025 elementos em função de apresentar um menor custo computacional em comparação com a malha mais refinada. A velocidade do ar nas linhas analisadas demonstrou uma velocidade do ar mais elevada na parte superior da câmara, durante a presença da grade. Entretanto, se aproximou rapidamente das velocidades observadas na linha central e na linha inferior. A velocidade da linha inferior aumentou significativamente na região onde as fontes emissoras estão presentes porém, permaneceu em um valor aceitável para a operação da câmara. As velocidades são explicitadas na Fig.3. As simulações referentes ao primeiro caso apresentaram menos pontos de recirculação, evidenciados na Fig.5, em comparação ao modelo utilizado em Correa et al. (2020), em função da espessura reduzida das barras da grade, assim como apresentou uma boa distribuição da velocidade do ar por toda a câmara, evidenciada na Fig.4. A distribuição de partículas também se mostrou inferior a apresentada em Correa et al. (2020), evidenciada na Fig.6. O primeiro caso estudado expõe um modelo de grade que apresenta uma melhor distribuição do ar no interior da câmara em função da redução da espessura das barras da grade, gerando menos pontos de recirculação assim como velocidades de menor intensidade e estáveis na região central da câmara. A análise das velocidades em diferentes alturas da câmara expõe uma maior velocidade do ar na parte superior logo após a grade porém se reduz rapidamente e permanece próxima as velocidades do centro e da base. A remoção das partículas se deu de forma eficiente como já era esperado em função do fluxo de ar utilizado.

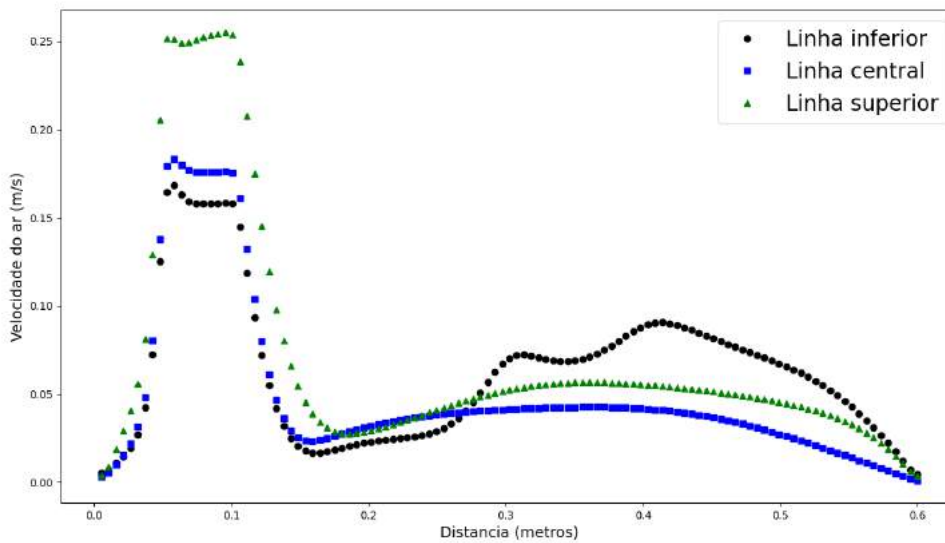


Figura 3. Velocidade do ar observada no primeiro caso, nas linhas selecionadas, valores em m/s.

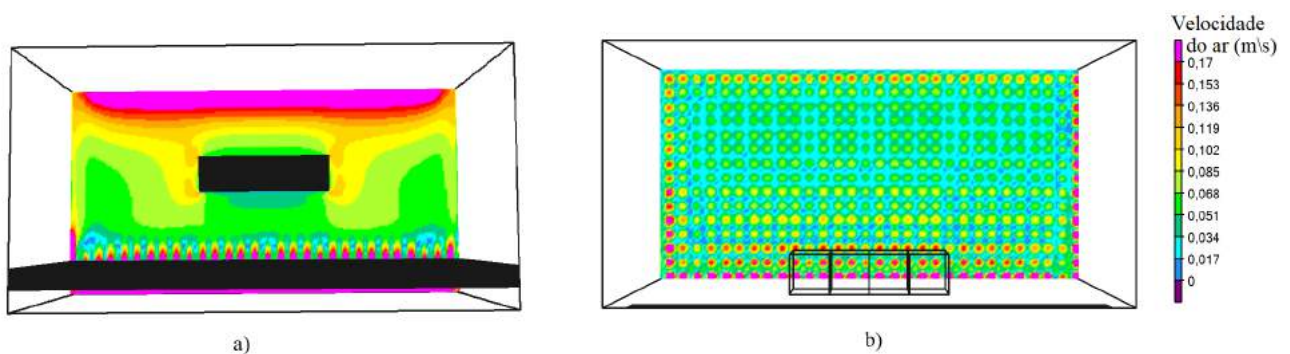


Figura 4. a) velocidade do ar na base da câmara, b) Velocidade do ar nas saídas dos furos da grade.

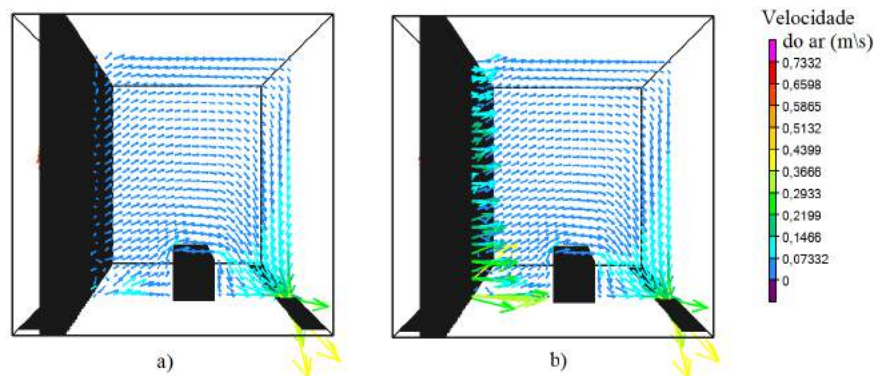


Figura 5. Vetores indicando a direção do ar na câmara limpa, a) apresenta os vetores em um plano próximo a região central da câmara onde há a presença das barras da grade e b) apresenta os vetores em um plano próximo a região central onde há a presença dos furos da grade.

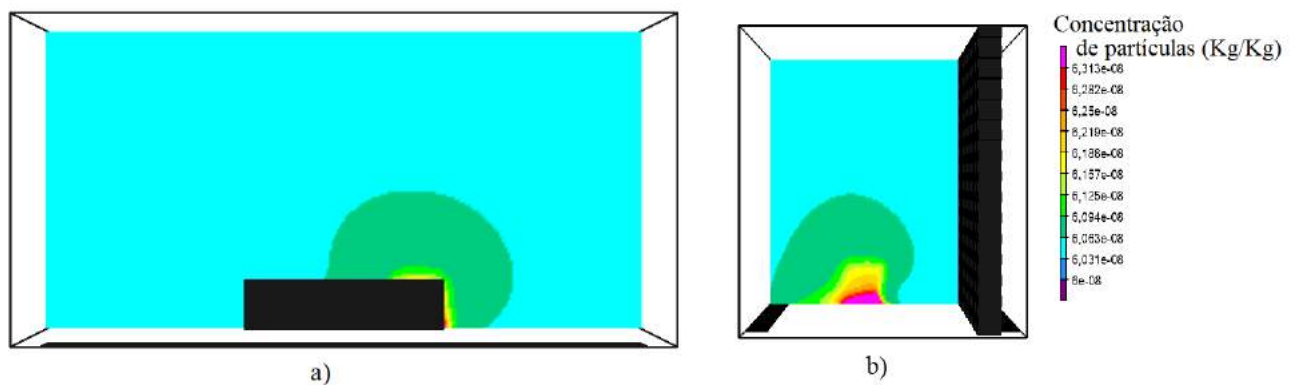


Figura 6. Distribuição de partículas gerada pela fonte emissora, a) vista frontal, b) vista lateral.

### 3.2 2º Caso

Assim como no primeiro caso, a validação apresentou uma diferença percentual de 2% na região central da câmara, ao comparar a malha mais refinada com a malha intermediária e em função do custo computacional, foi utilizada a malha intermediária para as simulações. As velocidades observadas nas linhas centrais definidas demonstraram uma grande diferença em comparação com o primeiro caso. Em função da presença de barras da grade na região onde as linhas foram selecionadas, o gráfico apresenta ausência de velocidade na região preenchida pela grade, como apresenta a Fig.7. A linha inferior apresentou valores negativos logo após a grade, indicando recirculação, e apresentou um aumento gradual, apresentando seu máximo próximo ao fim da câmara. É perceptível uma influência superior a observada no primeiro caso na região onde se encontram as fontes emissoras. As linhas central e superior apresentaram um rápido aumento da velocidade após a grade, estabilizando de forma semelhante a observada no primeiro caso porém, com velocidade superior. A distribuição da velocidade do ar apresentada logo após a grade se mostrou inferior a constatada no primeiro caso e apresentou uma velocidade superior na região próxima a base da câmara, como exibido na Fig.9. A distribuição de partículas se mostrou semelhante a constatada no primeiro caso, direcionando corretamente os contaminantes. O segundo caso estudado expõe um modelo de grade que apresenta furos de diferentes diâmetros hidráulicos, onde os furos da parte superior da câmara apresentam metade do diâmetro hidráulico dos furos da parte inferior. Em função da geometria da grade, o segundo caso apresenta mais pontos de recirculação, apresentado na Fig. 8. A análise das velocidades em diferentes alturas identificou uma velocidade do ar mais acentuada na base da câmara em comparação com a região central e a região superior. A remoção de partículas se deu de forma semelhante ao primeiro caso.

### 3.3 Comparação

O trabalho preliminarmente feito por Correa et al. (2020) utiliza uma grade de 55 furos com diâmetros hidráulicos de 0,05 m com o intuito de separar o ar e reduzir a velocidade do ar no interior da câmara. Entretanto tal modelo gerou muitos pontos de recirculação, se mostrando inapropriado quando comparado com o primeiro caso estudado neste artigo. O primeiro caso utiliza furos com a metade do diâmetro hidráulico do utilizado no estudo preliminar assim como uma quantidade superior de furos (288) enquanto o segundo caso utiliza furos com diferentes diâmetros hidráulicos de acordo

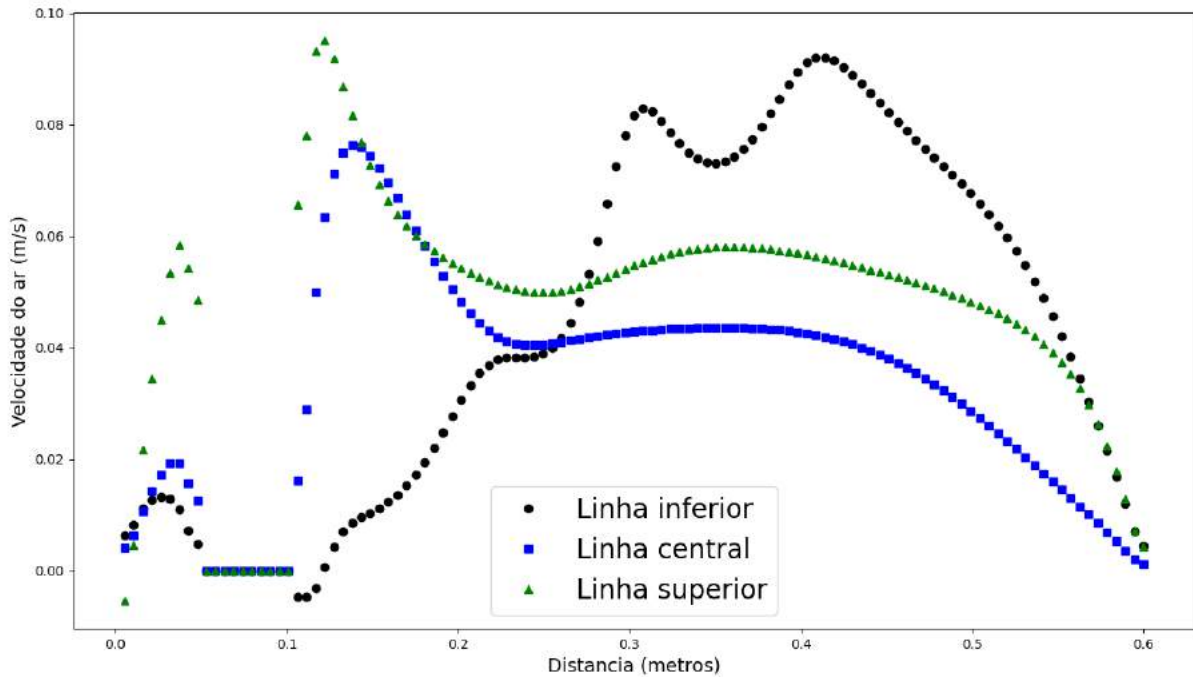


Figura 7. Velocidade do ar observada no segundo caso, nas linhas seleccionadas, valores em m/s.

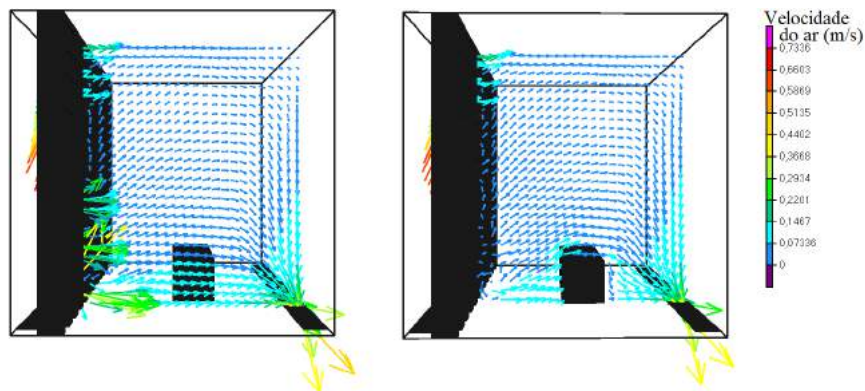


Figura 8. Vetores indicando a direção do ar na câmara limpa, a) apresenta os vetores em um plano próximo a região central da câmara onde há a presença das barras da grade e b) apresenta os vetores em um plano próximo a região central onde há a presença dos furos da grade.

com a altura de suas posições na grade. Enquanto o primeiro caso se mostrou um bom modelo a ser seguido, o segundo caso ressaltou a influencia das barras da grade na criação de pontos de recirculação.

Baseado nas informações observadas nos dois casos estudados, este trabalho conclui que o primeiro caso é uma alternativa melhor para atingir os propósitos da câmara limpa definidos por Guerrieri and Nunes (2019). A grade implementada no primeiro caso promove uma distribuição da velocidade do ar de forma mais homogênea, gerando um ambiente mais estável para a realização de estudos com microdispositivos, reduzindo a interferência em futuros estudos realizados no interior da câmara limpa.

#### 4. CONCLUSÃO

A distribuição do fluxo de ar de forma homogênea é fundamental para o desenvolvimento de estudos com microdispositivos no interior da câmara fria, o que origina o estudo aqui realizado. Ao testar dois tipos de geometrias diferentes, uma com furos de diâmetros hidráulicos iguais e outra variando os diâmetros, o estudo observa a influencia da grade na distribuição do fluxo de ar e na criação de pontos de recirculação. Para realizar a comparação entre os casos estudados foram utilizadas as velocidades do ar em três linhas distintas próximas a região central da câmara, em diferentes alturas

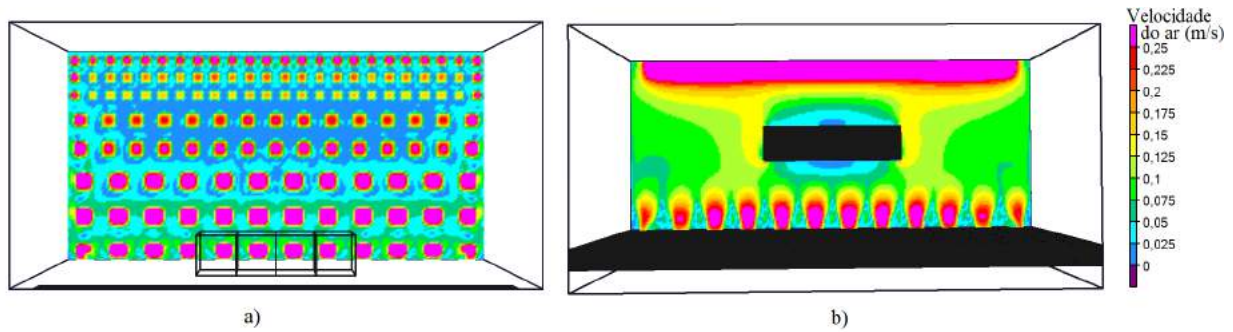


Figura 9. Velocidade do ar observada no segundo caso, a) vista frontal, b) vista superior.

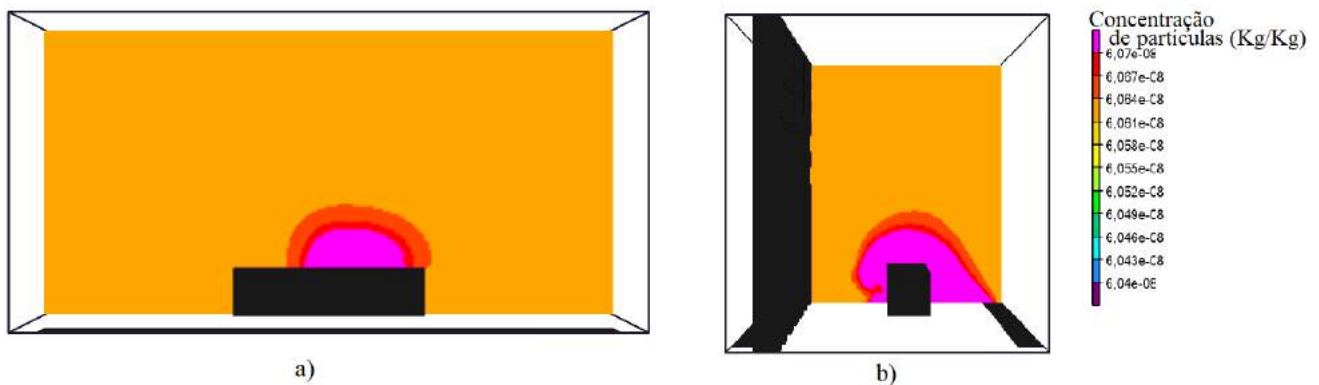


Figura 10. Distribuição de partículas gerada pela fonte emissora, a) vista frontal, b) vista lateral.

da câmara.

A análise dos resultados do primeiro caso, utilizando um número total de 288 furos com diâmetro hidráulico de 0,025 m cada, demonstra que uma grade com um maior número de furos e barras das grades com dimensões menores apresenta uma melhor distribuição do fluxo de ar após a grade assim como menos pontos de recirculação, originando um ambiente mais propício ao trabalho com microdispositivos.

É interessante para futuras análises a observação de grades com furos circulares e a implementação de diferentes espaçamentos entre os furos da grade, visando observar o espaço ideal entre os furos, com o intuito de gerar o menor número de pontos de recirculação possível.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de demonstrar seus sinceros agradecimentos aos funcionários e estudantes do CEFET/RJ Campus Itaguaí. Este trabalho foi apoiado por CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil) e por CEFET/RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro).

## 6. REFERÊNCIAS

- Barbosa, B.P.P. and Brum, N.C.L., 2018. "Validation and assessment of the cfd-0 module of contam software for airborne contaminant transport simulation in laboratory and hospital applications". *Elsevier Building and Environment*, Vol. 142, pp. 139–152.
- Correa, A.V.S., Guerrieri, D.C. and Nunes, J.S., 2020. "Particle distribution analysis in a clean air enclosure with a known particle source". In *Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2020*. online.
- Guerrieri, D.C. and Nunes, J.S., 2019. "Conceptual design of a clean air enclosure test bench for microdevices". In *Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019*. Uberlândia, Brazil.
- Walton, G.N. and Dols, W.S., 2013. *CONTAM user guide and program documentation*. National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, md edition.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.